



TR-33

KAJIAN *MOISTURE SENSITIVITY* CAMPURAN ASPAL HANGAT DENGAN BAHAN TAMBAH POLIMER *ETHYLENE-VINYL ACETATE* (EVA)

Jack Widjajakusuma¹, Christian Gerald Daniel^{2*}, dan Darren Ivan Tenardy³

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. MH. Thamrin Boulevard 1100, Tangerang, Banten

e-mail: jack.widjajakusuma@uph.edu

^{2*}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. MH. Thamrin Boulevard 1100, Tangerang, Banten

e-mail: christian.geralddaniel@gmail.com

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. MH. Thamrin Boulevard 1100, Tangerang, Banten

e-mail: christian.daniel@uph.edu

ABSTRAK

Studi ini mengevaluasi efek dari penambahan polimer *Ethylene-Vinyl Acetate* (EVA) kepada ketahanan campuran aspal hangat terhadap rendaman air (*moisture damage*). Pengujian *Semi-Circular Bending* (SCB) menggunakan sampel yang dibuat berdasarkan standar Bina Marga 2018 dengan modifikasi oleh penambahan EVA sebesar 4% - 6% dari berat bitumen. Sampel yang dibuat dibagi dalam dua grup, dimana kelompok pertama direndam selama 24 jam pada suhu 60°C berdasarkan ASTM D1975-11, sementara kelompok kedua didiamkan pada suhu ruang. Kedua grup ini kemudian melalui pengujian SCB berdasarkan standar ASTM D8044 – 16 dan NEN-EN 12697-44. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kuat tarik, energi fraktur, *flexibility index* (FI), dan *crack resistance index* (CRI) sebesar 5 – 34% maksimum pada kondisi sampel kering yang dihasilkan dari penggunaan fiber dengan dosis 0.3%. Sementara itu, spesimen modifikasi fiber yang melalui simulasi perendaman air menunjukkan kenaikan kapasitas deformasi (FI dan Jc) hingga mencapai 1 - 45% dibandingkan sampel kontrol. Hanya saja, penambahan 0.5% fiber menghasilkan rasio kuat tarik basah / kering terbesar mencapai 123%, sedangkan penambahan 0.3% menghasilkan rasio FI terbesar mencapai 120%. Dapat disimpulkan bahwa penambahan fiber selulosa menghasilkan dampak positif dengan variasi efek, dengan penambahan 0.3% menghasilkan kekuatan dan ketahanan terbesar pada kondisi kering, sedangkan penambahan dengan kadar 0.5% menghasilkan peningkatan kekuatan dan ketahanan terhadap retak yang terbaik dalam kondisi basah.

Kata kunci: campuran aspal hangat; *ethylene-vinyl acetate*; *moisture damage*; *semi-circular bending*

PENDAHULUAN

Moisture damage dapat diartikan sebagai kerusakan yang disebabkan oleh air atau kelembaban dan dapat berupa hilangnya daya rekat serta hilangnya kohesi. *Moisture damage* umumnya dapat diklasifikasikan berdasarkan mekanisme kerusakan yang terjadi, yakni pada skala mikro dan skala makro

. Kerusakan pada skala mikro dapat terjadi melalui beberapa alternatif mekanisme seperti terlepasnya ikatan antara bitumen yang bersifat hidrofobik dengan agregat yang mudah menyerap air, rusaknya kohesi bitumen, serta proses emulsifikasi spontan yang terjadi pada bitumen yang menyebabkan perubahan sifat reologinya. Sementara itu, tipe kerusakan secara makro dapat terjadi akibat penambahan tegangan permukaan serta efek erosi akibat aliran air juga dapat menyebabkan pengelupasan (*stripping*) antara bitumen dan agregat. Efek dari kerusakan akibat *moisture damage* dapat berupa kehilangan batuan (*stone loss*), penurunan kekuatan dan durabilitas, munculnya deformasi permanen serta efek penuaan yang tidak diharapkan yang timbul baik pada campuran aspal panas maupun hangat

. Dampak buruk akibat efek air ini pun menjadi salah satu perhatian utama pada campuran aspal hangat (*Warm Mix Asphalt* - WMA), yang walaupun memiliki beberapa keunggulan dibandingkan campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt* - HMA)

standar seperti pengurangan emisi yang mempengaruhi kenyamanan pekerja dan konsumsi energi, serta meningkatkan peluang penggunaan teknologi aspal daur ulang, tetapi WMA pun diketahui memiliki kelemahan besar terhadap air

Beberapa metode yang umumnya digunakan sebagai mitigasi dampak negatif dari pengelupasan dan *moisture damage* antara lain dengan menggunakan agregat dengan sifat fisik dan volumetrik yang lebih baik, modifikasi sifat agregat, penggunaan bahan aditif yang dapat mencegah kerusakan pada aspal, serta penggunaan sistem drainase yang baik. Salah satu contoh aditif yang lumrah digunakan pada campuran aspal untuk kasus ini adalah polimer. Studi yang dilakukan sebelumnya menyimpulkan secara rata-rata bahwa penambahan polimer dapat meningkatkan kekakuan dan kekuatan campuran aspal, serta meningkatkan durabilitas dan umur layannya baik ketika dicampurkan dalam metode campuran basah ke bitumen maupun dicampurkan langsung ke campuran aspal dengan metode campuran kering

Polimer yang umumnya digunakan pada studi tersebut adalah *polyethylene* (PE), *polyethylene terephthalate* (PET), dan *polypropylene* (PP).

Adapun penelitian ini bermaksud mengevaluasi penggunaan polimer *Ethylene-Vinyl Acetate* (EVA) yang memiliki sifat gabungan antara elastomer (bersifat seperti karet) dan termoplastik (dapat mengalami deformasi plastis seperti PE) dalam wujud granular terhadap ketahanan campuran aspal hangat terhadap *moisture damage*.

METODE KERJA

Proses produksi benda uji

Studi ini menggunakan bentuk sampel uji *Semi-Circular Bending* (SCB) untuk mengevaluasi perilaku dan durabilitas campuran aspal yang dimodifikasi terhadap beban tarik dalam simulasi kondisi terendam air. Sebelum memproduksi sampel SCB, seluruh komponen pembentuk campuran aspal yang terdiri dari agregat kasar, halus, *filler* dari semen Portland, bitumen, aditif Rediset untuk produksi campuran aspal hangat, dan polimer EVA berbentuk granular (Gambar 16) melalui pengujian karakteristik fisik dan volumetrik standar, seperti uji penetrasi, titik nyala dan titik bakar untuk bitumen, serta uji berat jenis dan penyerapan untuk agregat yang digunakan (Gambar 17). Bitumen yang digunakan bitumen standar PEN 60/70 dari Shell. Polimer EVA yang digunakan diproduksi oleh *Iterchemica* dengan nama *Superplast*, dimana penelitian sebelumnya telah mengklasifikasikan polimer ini sebagai material termoplastik



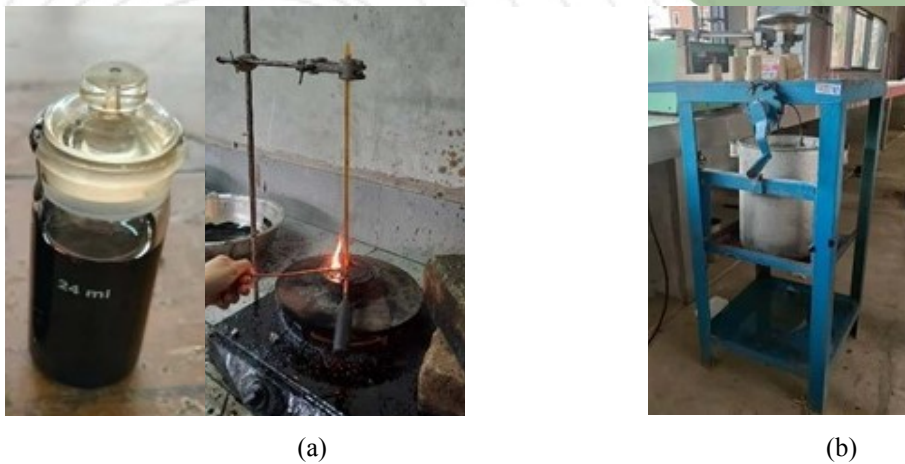
(a)

(b)

(c)

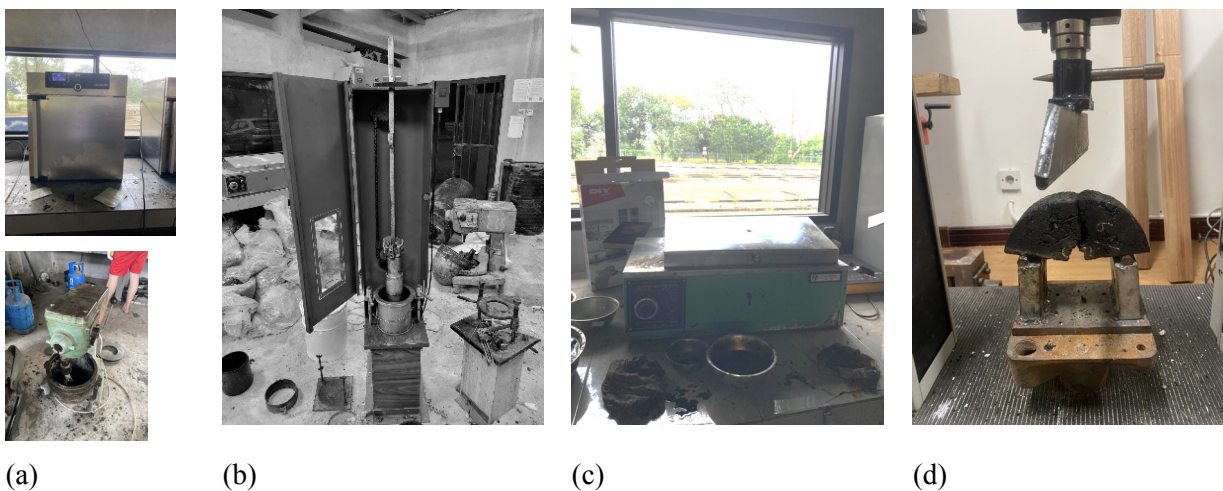
(d)

Gambar 16. Material komponen campuran aspal (a) agregat, (b) bitumen 60/70 Shell, (c) polimer EVA, dan (d) aditif WMA Rediset dan *filler* semen Portland



Gambar 17. Pengujian awal sifat fisik dan volumetrik (a) bitumen dan (b) agregat

Proses produksi yang dilakukan di laboratorium perkerasan jalan UPH mengikuti metode standar Bina Marga 2018, dimana seluruh material dipanaskan pada suhu 160oC selama 45 menit lalu diaduk pada mixer selama +3 menit untuk kemudian dipadatkan dalam mesin kompaksi standar Marshall sebanyak 75 kali tumbukan per sisi. Sampel SCB tersebut diproduksi dan akan diuji berdasarkan standar NEN-EN 12697-44, dengan salah satu grup spesimen yang dibuat akan direndam dalam bak water bath selama 24 jam dalam air dengan suhu 60oC sebelum melalui pengujian SCB yang dilakukan pada mesin uji Universal Testing Machine. Seluruh tahapan ini terlihat pada Gambar 18.



Gambar 18. Proses produksi sampel campuran aspal dengan langkah kerja (a) pemanasan di oven dan pencampuran di mixer, (b) kompaksi dengan mesin pematat Marshall, (c) simulasi perendaman air di *water bath*, dan d) uji SCB di UTM

Pengolahan data

Semua data yang didapatkan dari pengujian di laboratorium akan diolah untuk memperoleh sifat volumetrik dan sifat mekanis campuran aspal yang dibuat. Sifat volumetrik yang menjadi hasil studi ini adalah berat jenis, rongga udara (*air void*), dan rongga dalam mineral campuran (*void in mineral aggregate* - VMA), yang dihitung berdasarkan persamaan (1) - (3).

$$\rho = \frac{m_{kering} \times \rho_w}{m_{SSD} - m_{dalam\ air}} \quad (1)$$

$$VMA = 100\% \times \rho \frac{(100 - P_{\text{air}})}{G_{se}} \quad (2)$$

$$\text{Air Void} = 100\% \times \frac{G_{mm} \times \rho}{G_{mm}} \quad (3)$$

Dimana ρ adalah berat jenis spesimen, m_{kering} merupakan berat benda uji dalam kondisi kering, ρ_w adalah berat jenis air, m_{SSD} adalah berat benda uji dalam keadaan kering permukaan, $m_{\text{dalam air}}$ adalah berat benda uji dalam air, P_b adalah kadar aspal, dan G_{mm} merupakan berat jenis maksimum dari sampel aspal.

Selain sifat volumetrik sampel SCB yang dibuat, terdapat beberapa sifat mekanis yang dievaluasi dalam kajian ini, yakni kuat tarik, energi fraktur, *flexibility index* (FI), dan *critical strain energy* (J_c) yang dikalkulasi berdasarkan persamaan (4) - (7):

$$\sigma_{max} = \frac{4.263 P_{max}}{d \cdot t} \quad (4)$$

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} \text{ dimana } A_{lig} = (r - a)t \quad (5)$$

$$FI = \frac{G_f}{|m| \times 0.01} \quad (6)$$

$$CRI = \frac{G_f}{P_{max}} \quad (7)$$

Dimana P_{max} adalah beban maksimal yang tercatat saat pengujian, d adalah diameter sampel, t adalah ketebalan sampel, G_f adalah energi fraktur dalam Joules/m², r adalah radius sampel, W_f adalah usaha yang ditimbulkan dalam Joule, a adalah tebal benda uji dalam satuan meter, dan $|m|$ adalah nilai absolut dari *post peak slope* (kN/mm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdapat dua tahap dalam studi ini, yang dimulai dari pengujian kualitas material pembentuk campuran aspal yang dilanjutkan ke hasil pengujian volumetrik dan mekanis sampel campuran aspal yang dibuat dalam bentuk spesimen SCB. Hasil untuk tahap pertama ditunjukkan oleh Tabel 49.

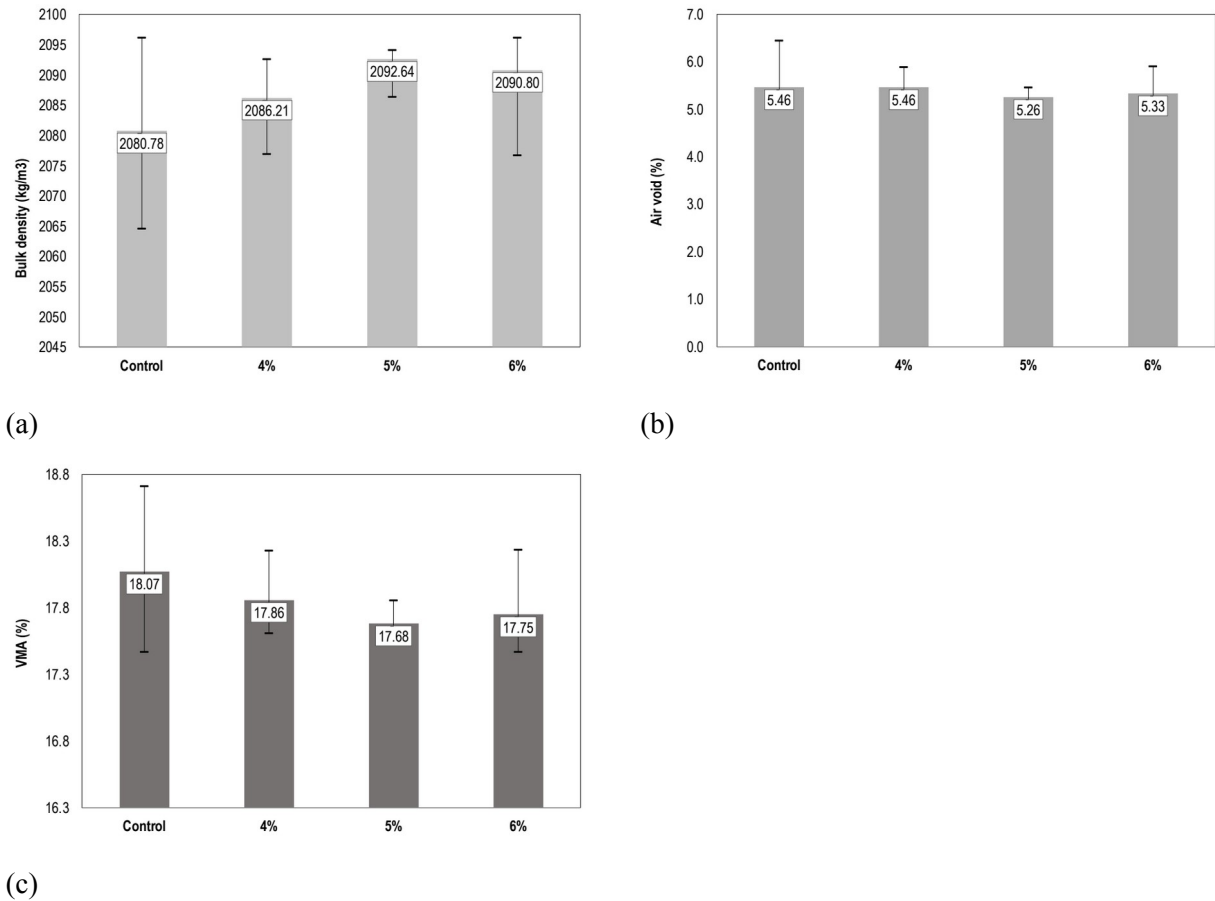
Tabel 49. Hasil uji sifat fisik dan volumetrik material campuran aspal

No.	Material	Properti	Unit	Hasil	Standar Bina Marga 2018
1	Bitumen	Berat jenis	gr/cc	1.085	≥ 1.0
		Penetrasi	dmm	64	60 - 70
		Titik nyala	°C	340	≥ 230
		Titik bakar	°C	349	-
2	Agregat kasar	Berat jenis	gr/cc	2.510	≥ 2.5
		Penyerapan	%	1.684	≤ 3
3	Agregat halus	Berat jenis	gr/cc	2.585	≥ 2.5
		Penyerapan	%	1.463	≤ 3
4	Filler	Berat jenis	gr/cc	2.946	-

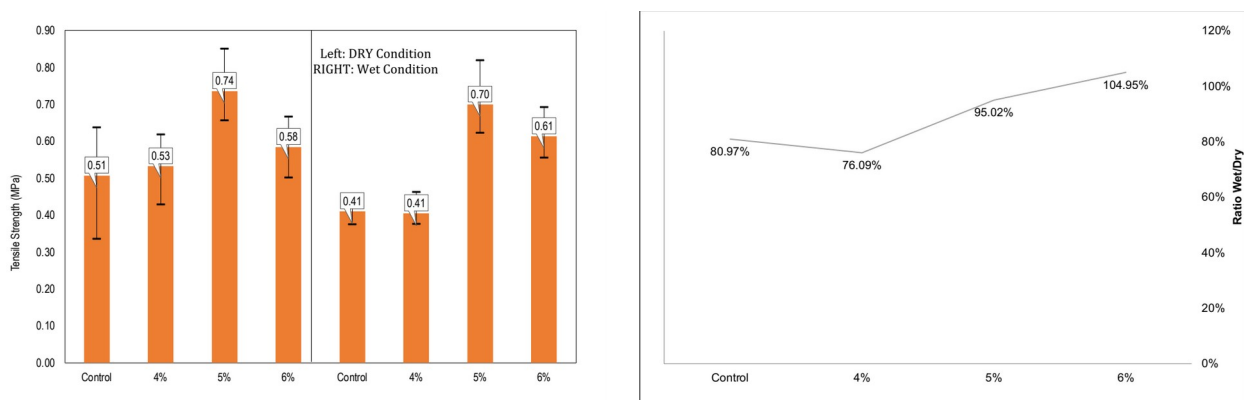
Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh material yang digunakan telah memenuhi standar yang ditetapkan sehingga dapat digunakan untuk tahap selanjutnya.

Untuk tahap selanjutnya yaitu pengujian SCB yang dilakukan baik untuk sampel aspal pada grup pertama yang disiapkan dalam kondisi kering, serta grup kedua yang disiapkan melalui kondisi basah. Hasil

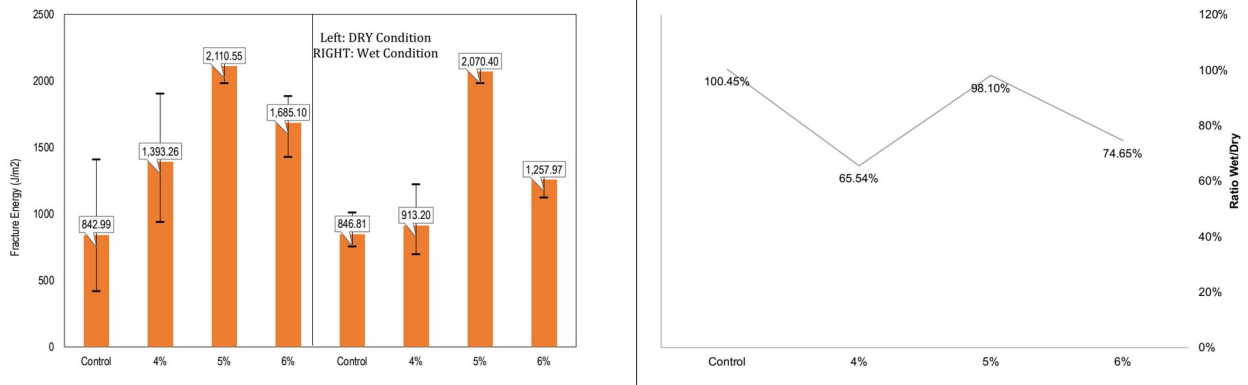
pengujian SCB pada studi ini adalah sifat volumetrik berupa berat jenis, rongga udara, serta rongga dalam agregat (*Void in Mineral Aggregate - VMA*) yang dinyatakan dalam Gambar 19 serta sifat mekanis seperti kuat tarik, energi fraktur, *flexibility index*, serta *crack resistance index* (CRI) yang dinyatakan pada Gambar 20 dan Gambar 21.



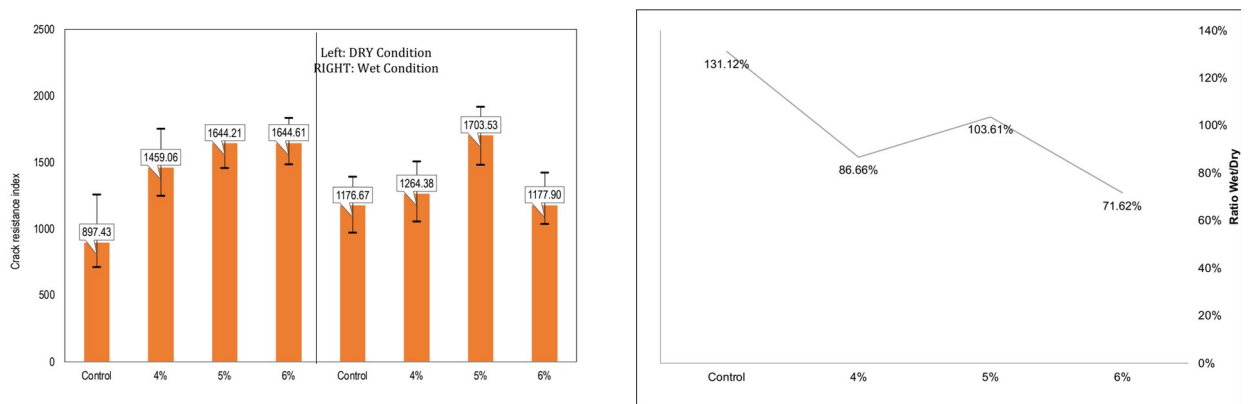
Gambar 19. Grafik Hasil Uji: (a) Berat jenis, (b) Rongga udara, dan (c) VMA



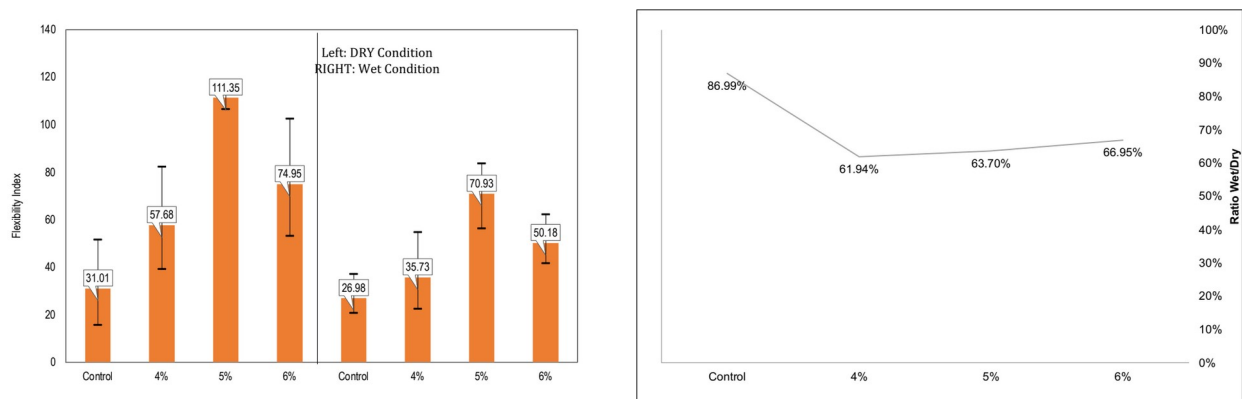
Gambar 20. Grafik Hasil Uji: (a) Kuat tarik dan (b) Rasio kuat tarik dalam kondisi basah dan kering



Gambar 21. Grafik Hasil Uji: (a) Energi fraktur dan (b) Rasio energi fraktur dalam kondisi basah dan kering



Gambar 22. Grafik Hasil Uji: (a) Crack resistance index (CRI) dan (b) Rasio CRI dalam kondisi basah dan kering



Gambar 23. Grafik Hasil Uji: (a) Flexibility Index (FI) dan (b) Rasio FI dalam kondisi basah dan kering

Gambar 19 menunjukkan nilai berat jenis, rongga udara, serta VMA setiap sampel SCB yang dibuat pada kajian ini. Dapat dilihat bahwa penggunaan polimer tidak mempengaruhi nilai sifat volumetrik sampel aspal yang diproduksi, dengan perbedaan nilai berat isi hanya mencapai 0.5%, rongga udara hanya memiliki selisih 3.7%, dan VMA memiliki selisih hingga 2% dibandingkan dengan sampel kontrol yang dibuat. Perbedaan kadar polimer yang digunakan pun tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap sifat volumetrik ini. Hal ini dapat disebabkan oleh sifat volumetrik polimer EVA sendiri yang memiliki berat jenis rendah (<1.0), serta dosis yang diperlukan sangat rendah hingga mencapai 6% dari berat bitumen yang digunakan sehingga tidak memiliki dampak signifikan terhadap sampel yang dibuat.



Adapun sifat mekanis sampel hasil pengujian menunjukkan kenaikan kuat tarik yang dinyatakan pada Gambar 20a akibat penggunaan polimer EVA dengan peningkatan hingga mencapai 45% pada kondisi kering serta 70% pada kondisi basah dibandingkan dengan sampel kontrol, dimana seluruh nilai ini dicapai melalui penggunaan EVA dengan dosis 5%. Selain itu, energi fraktur hingga *crack resistance index* (CRI) yang ditunjukkan pada Gambar 21. Grafik Hasil Uji: (a) Energi fraktur dan (b) Rasio energi fraktur dalam kondisi basah dan kering Gambar 21(b) dan Gambar 22(b) juga menunjukkan fenomena yang sama dengan dosis polimer 5% memberikan hasil maksimum pada kondisi kering maupun basah. Hal ini menunjukkan adanya peran positif polimer dalam meningkatkan kekakuan, seperti yang telah ditunjukkan pada penelitian penulis sebelumnya, serta ikatan dalam campuran aspal sehingga menghasilkan campuran dengan sifat mekanis yang meningkat. Nilai energi fraktur mengalami peningkatan maksimum sebesar 150% dan 145% pada kondisi kering dan basah, yang juga dihasilkan oleh sampel dengan modifikasi polimer sebesar 5%. Secara khusus untuk CRI dan FI menunjukkan peningkatan kemampuan deformasi sampel untuk menahan keruntuhan secara keseluruhan maupun pada fase setelah keretakan dimulai, dimana penambahan polimer dapat meningkatkan CRI pada kondisi kering dan basah hingga sebesar 83% dan 45%, serta FI yang menitikberatkan pada fase setelah mulainya keretakan sebesar 260% dan 162% pada kondisi kering dan basah. Hal ini dapat diartikan bahwa selain menambah kekuatan, penggunaan polimer dapat membentuk jalinan ikatan dengan fase mastik pada campuran aspal sehingga deformasi yang dapat terjadi menjadi lebih besar.

Lebih jauh lagi, rasio nilai sifat mekanis antara grup sampel yang diberikan simulasi kondisi perendaman air (basah) dan grup yang berada pada kondisi kering dapat digunakan untuk menyatakan ketahanan campuran aspal terhadap air, dimana nilai rasio yang makin tinggi menyatakan ketahanan yang makin baik. Pertama-tama, dapat dilihat pada Gambar 20(b) bahwa rasio kuat tarik sampel aspal yang dimodifikasi polimer mengalami kenaikan signifikan mulai dari 80% pada sampel kontrol hingga 104% pada sampel dengan polimer 6%, atau selisih mencapai 24%. Hal ini dapat menunjukkan juga efek positif dari penggunaan polimer pada ketahanan sampel aspal terhadap air. Adapun rasio yang sama pada nilai energi fraktur hingga FI Gambar 21(b) - Gambar 23(b) memang menunjukkan nilai rasio terbesar pada sampel kontrol hingga 100% untuk energi fraktur, 131% untuk CRI serta 87% untuk FI. Di sisi lain, secara umum rasio terbesar untuk ketiga parameter ini dihasilkan oleh penggunaan dosis 5% polimer hingga sebesar 98% untuk energi fraktur dan 104% untuk CRI. Sementara itu, rasio terbesar untuk FI dihasilkan oleh dosis polimer 6% sebesar 67%, disusul oleh dosis 5% sebesar 64%. Hal ini dapat menunjukkan bahwa penambahan material pada kasus ini dapat menghasilkan celah yang muncul akibat lepasnya ikatan antara polimer dan mastik aspal yang ditimbulkan oleh proses infiltrasi air serta kekakuan yang timbul di awal sehingga mengakibatkan rasio tersebut menjadi lebih kecil. Akan tetapi, dengan melihat nilai riil yang dihasilkan, baik pada sampel dengan kondisi basah maupun kering, menunjukkan bahwa penggunaan polimer tetap memiliki dampak yang positif terhadap ketahanan campuran aspal terhadap perendaman air, terutama dari sisi kekuatan. Adapun nilai rasio yang lebih besar dari 100%, terutama pada nilai kuat tarik, menunjukkan adanya juga peran dari penggunaan filler semen yang dapat mengeras akibat reaksi dengan air.

KESIMPULAN

Studi ini mencoba mengkaji dampak dari penggunaan polimer *Ethylene-Vinyl Acetate* (EVA) yang berbentuk granular terhadap sifat volumetrik dan mekanis campuran aspal hangat dengan meninjau ketahanan terhadap kerusakan akibat pengaruh air (*moisture damage*). Kadar polimer yang digunakan pada kajian ini memiliki variasi sebesar 4% - 6% dari berat bitumen yang digunakan, dimana sampel uji dibagi dalam dua grup agar salah satu grup sampel dapat melalui kondisi perendaman air dengan suhu 60°C selama 24 jam untuk mensimulasikan efek kerusakan akibat air sebelum dilakukan uji *Semi-Circular Bending* (SCB). Hasil pengukuran awal mengindikasikan efek dari penggunaan polimer yang tidak signifikan terhadap sifat volumetrik campuran aspal, dengan selisih nilai berat isi, rongga udara dan VMA antara sampel campuran aspal modifikasi polimer dengan sampel kontrol hanya mencapai maksimum 3.7%. Lebih jauh lagi, pengujian SCB menunjukkan hasil adanya peningkatan kekuatan tarik hingga sebesar 45% dan 70% pada sampel dari grup kering dan basah, energi fraktur sebesar 150% dan

145% pada sampel dari grup kering dan basah, nilai CRI mengalami peningkatan maksimum sebesar 83% dan 45% pada sampel dari grup kering dan basah, serta FI sebesar 260% dan 162% pada sampel dari grup kering dan basah, dimana seluruh nilai maksimum ini diraih oleh campuran aspal dengan modifikasi polimer EVA sebesar 5%. Adapun rasio antara sifat mekanis pada kondisi basah dan kering, yang menyatakan ketahanan terhadap efek perendaman air, menunjukkan bahwa rasio kuat tarik mengalami peningkatan akibat penambahan polimer dari 80% untuk sampel kontrol hingga 104% pada sampel aspal modifikasi. Selain itu, penambahan polimer sebesar 5% menghasilkan rasio energi fraktur dan *crack resistance index* (CRI) terbesar sebesar 98% dan 104%, serta rasio *flexibility index* (FI) tertinggi dihasilkan oleh penggunaan 6% polimer sebesar 67%. Walaupun memiliki nilai rasio yang lebih kecil dibandingkan sampel kontrol, yang dipengaruhi oleh ikatan antara polimer dan mastik aspal yang terpengaruh oleh infiltrasi air, tetapi seluruh nilai parameter yang dihasilkan tetap lebih tinggi yang mengindikasikan bahwa penggunaan polimer tetap memberikan dampak positif terhadap sifat mekanis campuran aspal. Secara keseluruhan, terlihat bahwa penggunaan polimer EVA dengan dosis 5% menghasilkan campuran aspal hangat dengan sifat mekanis terbesar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis hendak mengapresiasi bantuan dari Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Pelita Harapan untuk hibah penelitian dengan nomor 82/LPPM-UPH/II/2021. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Enceha Pacific yang telah menyediakan fiber selulosa yang digunakan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Albayati, A. H., Al-Mosawe, H. M., Allawi, A. A., & Oukaili, N. (2018). Moisture Susceptibility of Sustainable Warm Mix Asphalt. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3109435>
- Alnadish, A., & Aman, Y. (2019). Evaluation of aramid fibre-reinforced asphalt mixtures. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 9, pp. 1377–1388). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_99
- Apeageyi, A. K., Grenfell, J. R. A., & Airey, G. D. (2014). Moisture-induced strength degradation of aggregate-asphalt mastic bonds. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 83(January), 549–582. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.927951>
- Apostolidis, P., Liu, X., Daniel, C. G., & Erkens, S. (2019). *Fracture Performance of Synthetic Fibre-Reinforced Asphalt Mortar Fracture Performance of Synthetic Fibre-Reinforced Asphalt Mortar Section of Pavement Engineering Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology Department of C. February*.
- Apostolidis, P., Liu, X., Daniel, C. G., Erkens, S., & Scarpas, T. (2020). Effect of synthetic fibres on fracture performance of asphalt mortar. *Road Materials and Pavement Design*, 21(7), 1918–1931. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1574235>
- Bayazit, M., Das, K., & Tasdemir, Y. (2014). Moisture susceptibility of warm mix asphalt. In *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* (Vol. 21).
- Daniel, C. G., & Limbong, V. G. (2023). Evaluasi Moisture Sensitivity Campuran Aspal Hangat Skala Mastic Dengan Aditif Antistripping Wetfix BXE. *Prosiding KonTeks 16*.
- Daniel, C. G., Liu, X., Apostolidis, P., Erkens, S. M. J. G., & Scarpas, A. (2021). Low-temperature fracture behaviour of synthetic polymer-fibre reinforced warm mix asphalt. In *Green and Intelligent Technologies for Sustainable and Smart Asphalt Pavements* (1st ed., Vol. 1, Issue 3, pp. 358–362). Taylor & Francis. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003251125>
- Daniel, C. G., Liu, X., Apostolidis, P., Erkens, S., & Scarpas, A. (2019). Impact of synthetic fibres on asphalt concrete mix. *Bituminous Mixtures and Pavements VII- Proceedings of the 7th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, ICONFBMP 2019*, 709–711. <https://doi.org/10.1201/9781351063265-96>



- Daniel, C. G., Widjajakusuma, J., Otto, I., & Saputan, C. (2022). The Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Synthetic Polymer Modified Hot and Warm Mix Asphalt. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1117(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1117/1/012002>
- Diab, A., Singh, D., & Pais, J. C. (2017). Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes: A Literature Review. *4th Conference of Transportation Research Group of India (CTRG)*, 1–11.
- Giustozzi, F., Crispino, M., Toraldo, E., & Mariani, E. (2015). Mix design of polymer-modified and fiber-reinforced warm-mix asphalts with high amount of reclaimed asphalt pavement: Achieving sustainable and high-performing pavements. *Transportation Research Record*, 2523, 3–10. <https://doi.org/10.3141/2523-01>
- Hossain, Zahid, Roy, & Sumon. (2018). *Impacts of Moisture on Asphalt Properties*. <https://orcid.org/0000-0003-3395-564X>
- Jaskuła, P., Stienss, M., & Szydłowski, C. (2017). Effect of Polymer Fibres Reinforcement on Selected Properties of Asphalt Mixtures. *Procedia Engineering*, 172, 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.026>
- Jattak, Z. A., Hassan, N. A., & Mohd Satar, M. K. I. (2021). Moisture susceptibility and environmental impact of warm mix asphalt containing bottom ash. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00636>
- Jegatheesan, N., Rengarasu, T., & Bandara, W. M. K. R. T. W. (2018). *Effect of Polyethylene Terephthalate (PET) Fibres as Binder Additive in Hot Mix Asphalt Concrete*. <https://www.researchgate.net/publication/329906239>
- Joni, H. H., & Abed, A. H. (2022). Evaluation the Moisture Sensitivity of Asphalt Mixtures Modified with Waste Tire Rubber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 961(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012029>
- Kringos, N., & Scarpas, A. (2008). Physical and mechanical moisture susceptibility of asphaltic mixtures. *International Journal of Solids and Structures*, 45(9), 2671–2685. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.12.017>
- Kringos, N., Scarpas, A., Copeland, A., & Youtcheff, J. (2008). Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes Part 2: Moisture susceptibility parameters. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(2), 129–151. <https://doi.org/10.1080/10298430701792227>
- Liu, L., Liu, L., & Yu, Y. (2023). Study of Factors Influencing Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Using the Surface Free Energy Approach. *Polymers*, 15(13), 2798. <https://doi.org/10.3390/polym15132798>
- Malladi, H., Ayyala, D., Tayebali, A. A., & Khosla, N. P. (2015). Laboratory Evaluation of Warm-Mix Asphalt Mixtures for Moisture and Rutting Susceptibility. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014162. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001121](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001121)
- Mashaan, N., Karim, M., Khodary, F., Saboo, N., & Milad, A. (2021). Bituminous Pavement Reinforcement with Fiber: A Review. *CivilEng*, 2(3), 599–611. <https://doi.org/10.3390/civileng2030033>
- Montanelli, Eng. F., & srl, I. (2013). Fiber/Polymeric Compound for High Modulus Polymer Modified Asphalt (PMA). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.096>
- Mrema, A. H., Noh, S. H., Kwon, O. S., & Lee, J. J. (2020). Performance of glass wool fibers in asphalt concrete mixtures. *Materials*, 13(21), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma13214699>
- Naushad Pasha, S., & Madhuri, M. (2017). *Investigation Of Modified Bitumen Using Glass Fibre In Bituminous Concrete* (Vol. 3). www.ijariie.com
- Omar, H. A., Yusoff, N. I. M., Mubarak, M., & Ceylan, H. (2020). Effects of moisture damage on asphalt mixtures. In *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* (Vol. 7, Issue 5, pp. 600–628). Chang'an University. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.07.001>
- Shanbara, H. K., Ruddock, F., & Atherton, W. (2018). Predicting the rutting behaviour of natural fibre-reinforced cold mix asphalt using the finite element method. *Construction and Building Materials*, 167, 907–917. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.072>
- Slebi-Acevedo, C. J., Lastra-González, P., Pascual-Muñoz, P., & Castro-Fresno, D. (2019). Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 200, pp. 756–769). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.171>

KoNTekS17

Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-17

- Takaikaew, T., Tepsriha, P., Horpibulsuk, S., Hoy, M., Kaloush, K. E., & Arulrajah, A. (2018). Performance of fiber-reinforced asphalt concretes with various asphalt binders in Thailand. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002433)
- Tong, Y., Luo, R., & Lytton, R. L. (2015). Moisture and aging damage evaluation of asphalt mixtures using the repeated direct tensional test method. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(5), 397–410. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1007234>
- Zaumanis, M. (2011). *Asphalt is Going Green: Overview of Warm Mix Asphalt technologies and research results from all over the world* (1st ed.). Lambert Academic Publishing.
- Zaumanis, M. (2014). Warm mix asphalt. *Green Energy and Technology*, 204, 309–334. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44719-2_10
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2016). 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits. *Transportation Research Procedia*, 14, 3493–3502. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.315>